柴达木盆地巨型沙波纹条带表层沉积物粒度和地球化学元素组成特征

王利杰， 肖锋军， 董治宝， 马慧榕， 陈 颢
（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119）

摘 要：巨型沙波纹条带（Megaripple stripes，MRS）是一种巨型沙波纹在来流方向上呈条带状分布的纵向风成地貌，包括巨型沙波纹尺寸较大的巨型沙波纹走廊（Megaripple corridor，MRC）和尺寸相对较小的微床面形态走廊（Smaller bedform corridor，SBC）。采集柴达木盆地MRS表层沉积物样品共112个，对其物理性质（粒度特征）和化学性质（常量元素和微量元素）进行分析。结果表明：(1) 柴达木盆地MRS表层沉积物中MRC的优势粒级为砾石（44.24%~50.19%）和极细沙（15.91%~20.42%），粒度分布呈双峰型；SBC的优势粒级为极粗沙（26.00%~35.90%）和细沙（14.80%~20.47%），粒度分布呈三峰型。(2) MRS分选很差，偏度以正偏为主，峰态为宽到很宽。(3) MRC和SBC各元素含量差异不大。常量元素以SiO_2和Al_2O_3为主，含量分别在63%和10%左右；微量元素以Cr、Co、Mo和Ba为主。除Cr和Mo外其余元素均为迁移淋失的状态。(4) 柴达木盆地MRS为寒冷干燥环境下的低等化学风化，处于大陆风化初期，化学风化侵蚀相对稳定。

关 键 词：巨型沙波纹条带；柴达木盆地；沉积物；粒度；化学元素
文章编号：1000－6060(2023)11－1826－10(1826～1835)

沙波纹是风沙地貌研究的基本内容，也是最常见的风沙地貌形态。近一个世纪以来，对于沙波纹形态、动力学等相关研究从未间断，并随着科学技术的不断发展，研究方法和手段日新月异[1-5]。相关研究中，以巨型沙波纹居多。大多数情况下，巨型沙波纹的分布没有规律，因此研究对象多为巨型沙波纹个体。但当巨型沙波纹在来流方向上呈条带状分布，就形成了巨型沙波纹条带（Megaripple stripes，MRS）。根据Gough[6]的定义，MRS是一种纵向的风成地貌，主要包括巨型沙波纹走廊（Megaripple corridor，MRC）及微床面形态走廊（Smaller bedform corridor，SBC），二者在垂直于风向方向上交替出现。MRC的巨型沙波纹呈新月形，翼角指向下风向；而SBC的巨型沙波纹则呈抛物线形，翼角指向上风向。MRC及SBC本质上都是由巨型沙波纹组成，但SBC的巨型沙波纹尺寸更小。虽然同一风况内出现两种尺寸差异较大的巨型沙波纹并不稀奇，但这种在垂直于风向方向上的独特排列却很罕见[6]。

这种独特的地貌最早于20世纪50年代发现[7]，之后一些学者也有所提及[8-11]，但都未引起足够的重视并开展相关研究。沉积物理化性质是风沙地貌研究的一个重要方面，沉积物中蕴含着地貌形成演化的重要信息，可以据此推断颗粒运动、风化侵蚀以及沉积环境等[12]。沉积物粒度可以反映沙粒的运动形式以及运移过程，据此推断其组成物质来源[1,13]；沉积物的化学元素特征也在一定程度上反映物质来源[13-15]，更重要的是可以借此推断其形成演化过程、沉积环境及风化强度[12,16-18]，目前已有大量

收稿日期：2023-02-25； **修订日期：**2023-04-21
基金项目：国家自然科学基金项目（42071009）；第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0403）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（GK202103141）资助
作者简介：王利杰（1997-），男，硕士研究生，主要从事风沙地貌学研究. E-mail: ljwang55@snnu.edu.cn
通讯作者：肖锋军（1984-），男，副教授，主要从事风沙地貌学研究. E-mail: xiaofengjun@snnu.edu.cn

关于中国主要沙漠沉积物理化性质的研究[16,19-23]。但MRS作为一种研究程度较弱的风沙地貌，各方面研究都相对匮乏，对其沉积物的理化性质更是知之甚少。鉴于此，本文以柴达木盆地MRS为研究对象，现场采集大量表层沉积物样品，分析其物理性质和化学性质，研究MRS物质组成特征和分选特征的数据，研究结果可为后续对其形成演化及风沙侵蚀与沉积过程的研究提供参考。

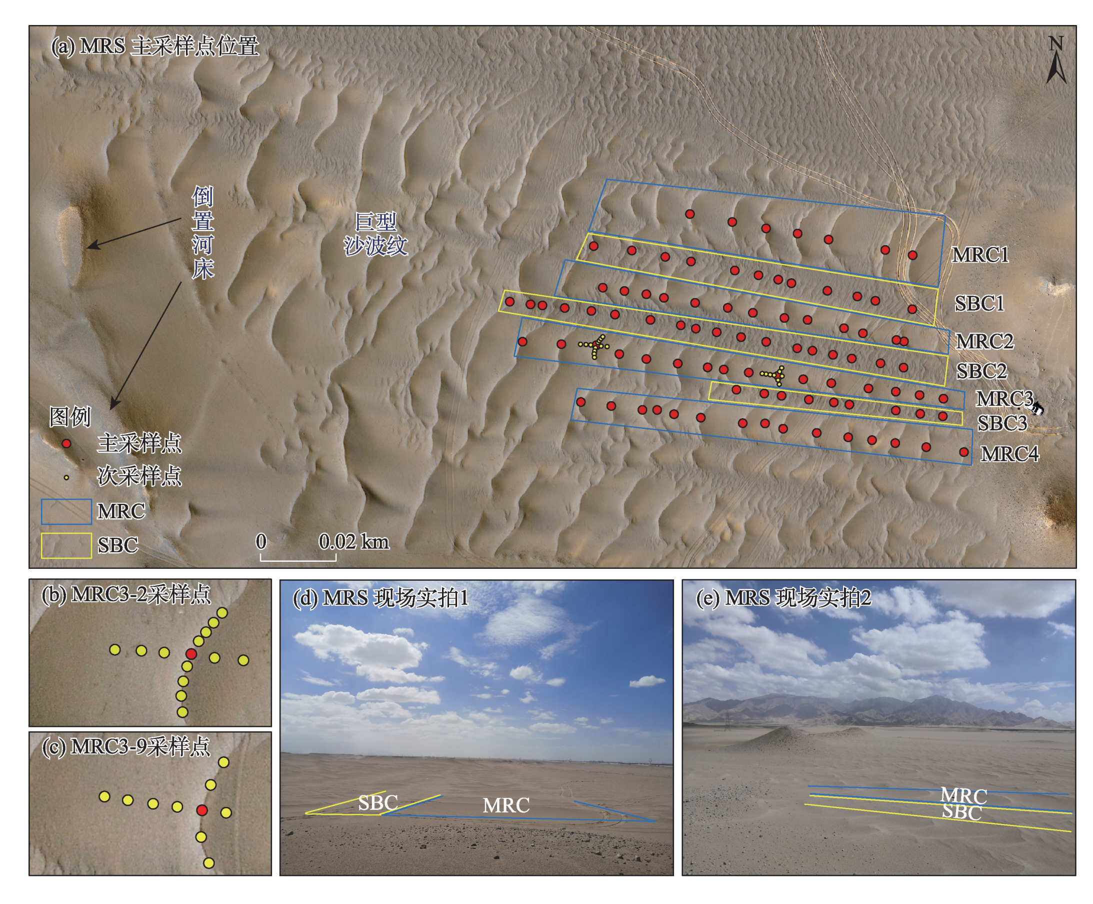
1　材料与方法

1.1　研究区概况

柴达木盆地是中国三大内陆盆地之一，面积约为24×10⁴ km²。盆地西北抵阿尔金山脉，西南至昆仑山脉，东北到祁连山脉，大体呈三角形[24]。MRS在柴达木盆地分布较广泛，以盆地中南部(36°20′04″N，94°55′45″E；海拔2824 m)为研究区，该区隶属于青海省海西蒙古族藏族自治州格尔木市，区域内存在各个发育阶段的MRS，其大都发育在倒置河床的下风向。倒置河床是一种河流状正地貌，呈现树枝状、锥状等形态[22,25]。研究区气候属典型的高原大陆性气候，夏季平均气温在17.1 ℃左右，冬季平均气温在-7.8 ℃左右，全年降水量较少，雨热同期，降水量的空间分布差异较大[26]。该区域输沙势44.5 VU，合成输沙势37.9 VU，属低风能环境，合成输沙方向为285°±10°，主导风向为西风和西北风[27]。

1.2　样品采集

虽然MRS在影像中特征明显，但实地却不易分辨。研究区内大多数MRC巨型沙波纹的波长在5 m左右，SBC巨型沙波纹的波长大都在1 m以下，这种尺寸的MRS在现场很难分辨。我们在该区域内选取了一处MRS尺寸较大的位置进行采样(图1a)，该处MRC巨型沙波纹波长在8 m左右，SBC巨型沙波纹波长在1 m左右，可以大体分辨出条带特征(图1d、e)。2021年7月实地采取表层沉积物样品，采样点如图1a~c所示。样品采集位置包括迎风坡、波峰以及背风坡，所有样品取样范围均为5 cm×5 cm，深



注：MRS为巨型沙波纹条带；MRC为巨型沙波纹走廊；SBC为微床面形态走廊；巨型沙波纹条带的上风向区域为常规的巨型沙波纹。

图1　采样点分布

Fig. 1　Sampling point distribution

度0~2 cm,共采集4条MRC和3条SBC样品112个。

1.3 分析方法

表层沉积物理化性质包括物理性质和化学性质。物理性质主要是粒度相关特征。将粒径大于2 mm的样品以粒径(Φ)间隔为1/3的标准检验筛进行筛分;粒径小于2 mm的样品使用英国马尔文公司生产的Mastersize3000激光粒度仪(测量范围0.01~3500 μm)进行测量。数据归一化后,平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(SK)、峰度(K_g)等粒度参数的计算在GRADISTAT软件中完成,按Folk-Ward[28]方法计算,依据Udden-Wentworth[29-30]标准进行粒级划分。化学性质主要为化学元素和化学风化特征,将样品研磨成粉末后压片制样,使用德国BRUKER公司生产的X-Ray荧光光谱仪进行元素测定。

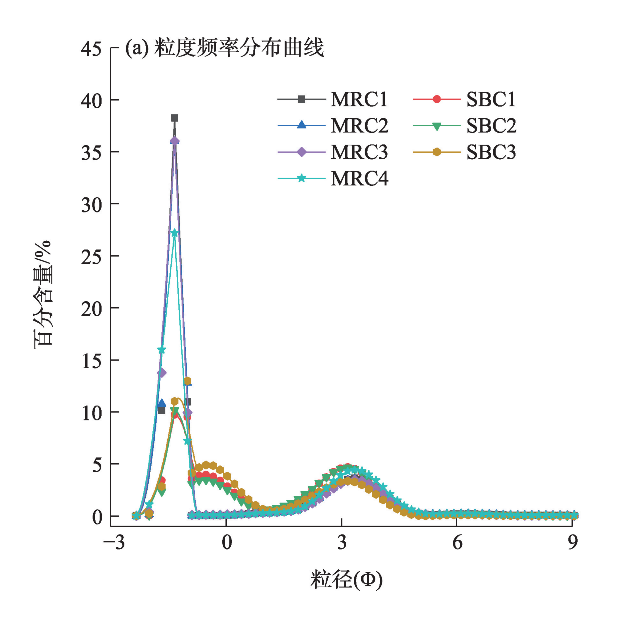
2 结果与分析

2.1 物理性质

2.1.1 粒级级配 MRS本质上是由一个个巨型沙波纹组成,粒级组成与巨型沙波纹特征相似。MRC粒度分布呈双峰型,SBC呈三峰型(图2a)。MRC的优势粒级为砾石和极细沙。砾石占比44.24%~50.19%,平均值为47.47%。极细沙占比15.91%~20.42%,平均值为17.24%。从MRC产生到消失,极粗沙的含量呈递增趋势。除砾石和极细沙之外占比最高的为细沙,粗沙和中沙占比最低,含量在2.30%以内。SBC的优势粒级为极粗沙和细沙。极粗沙的平均占比在26.00%~35.90%,平均值为29.98%。细沙平均占比14.80%~20.47%,平均值为18.44%。沿条带方向极粗沙含量波动增长,逐渐占据绝对优势;中沙占比最低,在5.33%以内。可以看出,MRS的粒级组成两级分化明显(表1),极粗颗粒和极细颗粒占据绝对优势,与MRC相比,SBC粗颗粒的尺寸要小一些,故而SBC的巨型沙波纹尺寸要比MRC的小[2]。

概率累积曲线能反映沉积物粒度分布与搬运方式间的关系,进而可以用以推测形成发育环境[31]。风成沉积物的概率累积曲线大都为2~4段独立线段[32]。柴达木盆地MRS表层沉积物概率累积曲线为3段式(图2b),表示沉积物蠕移、跃移和悬移3种运动方式均存在[13]。MRC的概率累积曲线位于SBC的左侧,大部分位置斜率要大于SBC,表明MRC的风沙活动较SBC要更加频繁和强烈[33]。MRC和SBC虽然都有差异较大的个体,但概率累积频率变化的总体趋势仍保持一致。

2.1.2 粒度参数 总体来看,MRC及SBC的粒度参数变化表现出了一致性。MRC平均粒径-0.09~1.63,平均值为0.37;SBC平均粒径0.26~1.86,平均值为1.02,二者标准差在0.5左右。其中SBC1和SBC2各处平均粒径均处于剧烈波动之中,且波动幅度很大。MRS的颗粒分布极不均匀,MRC分选系数2.01~2.37,平均值为2.21,分选很差;SBC分选系数1.71~2.75,平均值为1.98,分选较差至分选很差,



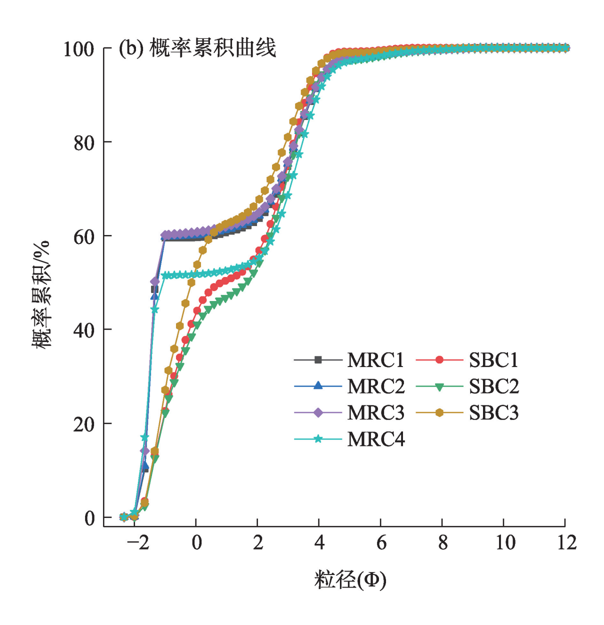


图2 MRS表层沉积物粒度频率分布和概率累积曲线

Fig. 2 Grain size frequency and cumulative frequency curves of surface sediments at MRS

表1　MRS表层沉积物粒级级配

Tab. 1　Grain size distribution of surface sediments at MRS

粒级	粒径/mm	沙粒级配/%						
		MRC1	SBC1	MRC2	SBC2	MRC3	SBC3	MRC4
砾石	>2	48.51	13.13	46.95	12.59	50.19	14.12	44.24
极粗沙	1~2	11.03	28.03	13.01	26.00	10.45	35.90	7.44
粗沙	0.5~1	1.02	9.20	1.19	8.22	1.26	12.41	0.83
中沙	0.25~0.5	2.22	4.51	2.19	5.33	2.23	3.76	1.89
细沙	0.125~0.25	12.00	20.05	11.97	20.47	11.62	14.80	14.16
极细沙	0.0625~0.125	16.57	19.65	16.04	19.70	15.91	14.21	20.42
粉沙黏土	<0.0625	8.65	5.43	8.65	7.68	8.33	4.80	11.02

注:MRS为巨型沙波纹条带;MRC为巨型沙波纹走廊;SBC为微床面形态走廊。下同。

SBC分选性稍好于MRC。MRC和SBC的峰态均为宽到很宽,MRC峰度平均值为0.57,标准差为0.05;SBC峰度平均值为0.65,标准差为0.18,均波动不大。在偏度上,MRC和SBC总体上均以正偏为主,意味着沉积物包含“细尾”,较细的颗粒进入粗颗粒的间隙并被捕获固定[5,34]。虽然不同位置的粒度参数出现了一定程度的差异,但总体趋势保持一致(图3a~g)。

从MRC巨型沙波纹迎风坡到背风坡,平均粒径-0.16~1.71,平均值为0.96。平均粒径先减小,过波峰后逐渐增大。粗颗粒在波峰处聚集,故而在MRC巨型沙波纹的波峰位置平均粒径值最小,意味着颗粒最粗。分选系数2.04~2.27,平均值为2.05,分选很差。峰度0.55~0.84,平均值为0.63,峰态为宽至很宽。偏度-0.48~0.85,平均值为0.08,正偏、负偏同时存在。从迎风坡到背风坡的粒度参数变化与MRC整体保持一致(图3i、k)。从脊线方向看,平均粒径-0.25~0.50,平均值为0.04。分选系数1.87~2.26,平均值为2.09,分选很差。偏度0.43~0.86,平均值为0.80,均为正偏。峰度差异大,大多数位置峰态很宽,但在MRC3-9翼角位置峰态却很窄(图3h、j)。

2.2　化学性质

2.2.1　地球化学元素特征　沉积物的化学元素组成能一定程度上反映其物源、沉积环境及风化程度[13]。柴达木盆地MRS表层沉积物常量元素中SiO_2占据绝对优势(表2),MRC中的含量为61.22%~64.09%,SBC中的含量为62.43%~65.83%。Al_2O_3含量次之,MRC和SBC中的含量较为接近,在10%左右。Na_2O、CaO和Fe_2O_3的含量为1.70%~4.85%,MgO的含量为0.54%~1.12%,TiO_2、MnO和P_2O_5的含量均很低,在0.17%以内。MRC和SBC的常量元素中SiO_2含量差距最大,相差2.87%,其余常量元素含量差距不大,均在1.66%以内,意味着二者沉积物物源具有同源性[17]。所有常量元素的变异系数均小于0.3,说明其含量在MRS不同位置无较大变动。

与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库姆塔格沙漠和塔克拉玛干沙漠相比,各常量元素含量均有一定程度的差异(表2)[13]。MRS中的SiO_2含量与塔克拉玛干沙漠(62.05%)最为接近,低于其他沙漠,Al_2O_3含量也是如此。Na_2O和CaO的含量高于这4个沙漠,而Fe_2O_3、MgO和K_2O的含量相比之下偏低[13,22]。一般以上陆壳(Upper continental crust,UCC)元素丰度为标准作UCC标准化图,柴达木盆地MRS所有常量元素的UCC标准化值均小于1(图4a),意味着所有常量元素均为亏损状态[17]。对比UCC,除CaO的含量较为接近外,其余常量元素均表现为被迁移淋失,以Al_2O_3最为严重(图4a)。

MRS表层沉积物中的微量元素以Cr、Co、Mo和Ba为主,其中Cr平均含量大于115 $\mu g \cdot g^{-1}$,Ba平均含量大于530 $\mu g \cdot g^{-1}$。与常量元素相似,微量元素含量整体变化不大,变异系数均小于0.36。相较于UCC,Cr和Mo的UCC标准化值大于1,表现为富集状态(图4b)。MRC中的Co呈富集状态,而SBC中则表现为亏损。对于Ba,二者情况刚好相反,SBC表现为富集,MRC表现为亏损。除此之外,其余微量元素均处于亏损状态。

2.2.2　化学风化特征　Rb/Sr比值是衡量沉积物化学风化程度的指标之一,比值越大,风化程度越高。MRS表层沉积物Rb/Sr比值为0.21~0.26,平均0.23,小于巴丹吉林沙漠(0.37~0.42)[23]、腾格里沙漠(0.40~0.52)[23]以及毛乌素沙地(0.15~0.56)[16],说明柴达木

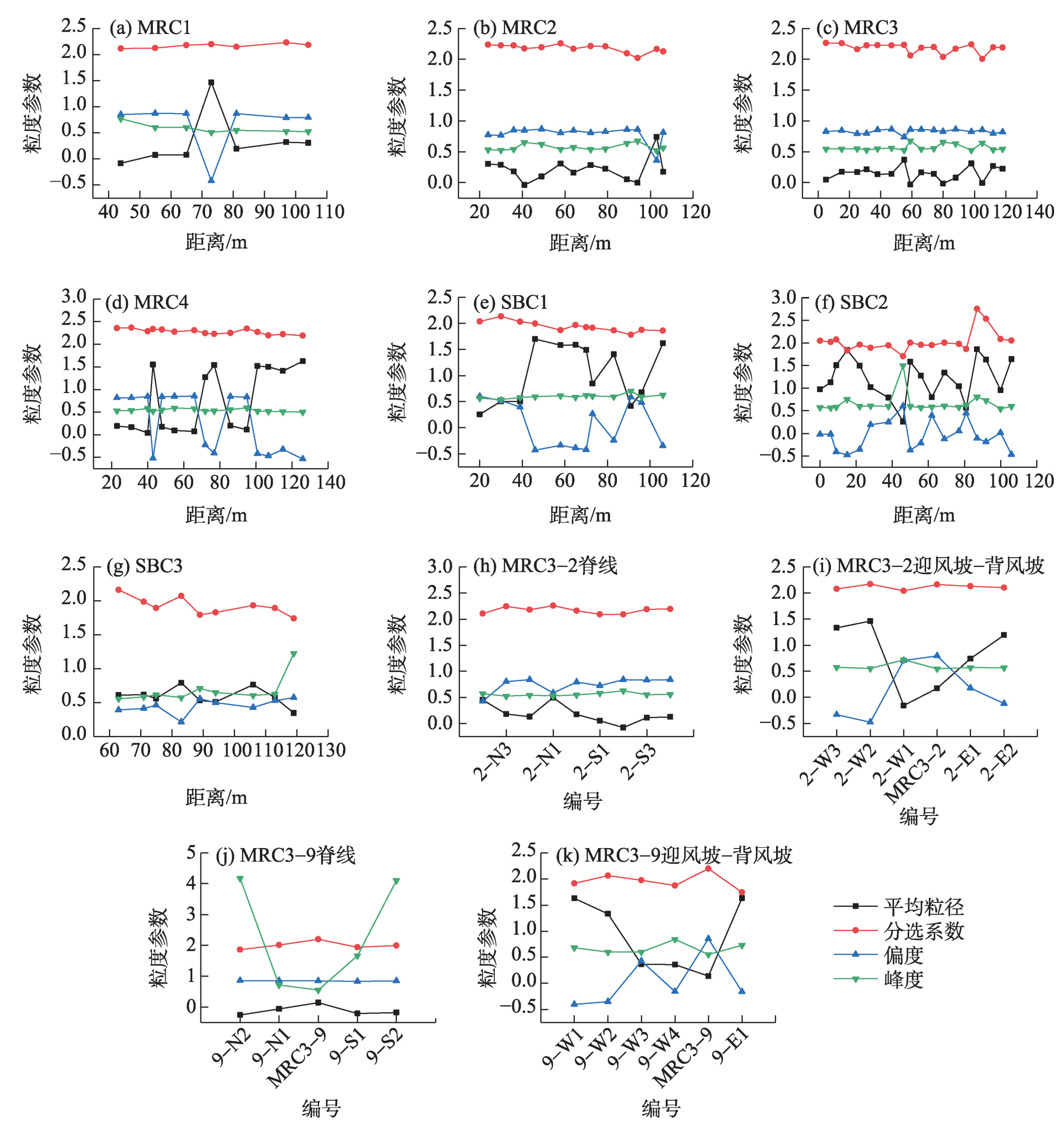


图3 MRS表层沉积物粒度参数

Fig. 3 Grain size parameters of surface sediments at MRS

盆地MRS出现的区域风化程度要比其他沙漠低。化学蚀变指数(CIA)也可用于反映沉积物的风化程度，同时还可据此判断沉积气候环境[16]。MRS的CIA为49.15~53.95，指示MRS的沉积环境为寒冷干燥的气候条件，化学风化程度较低，与前者结果一致。MRS的风化程度要高于UCC(48)，与中国黄土(52.9)相近。

为了反映沉积物化学风化中的成分和矿物变化及风化趋势，通常采用A-CN-K三角图解与CIA相结合[21,36]。将柴达木盆地MRS表层沉积物的主要化学组成投影在A-CN-K三角图中(图5a)，并与UCC、中国黄土以及陆源页岩进行比对可以发现，MRC和SBC的平均组成与UCC较为接近，且分布很集中，说明MRS各处风化程度差异不大，化学风化侵蚀处于相对稳定的状态。MRS分布在UCC风化趋势线的端点附近，处于大陆风化的初期，这一时期为去Na和Ca的阶段，主要为斜长石的风化[37]。化学风化分析中另一个常用的是A-CNK-FM三角图(图5b)，用以指示Fe和Mg的含量变化。结果显示，MRS中的Fe、Mg元素含量低于上部陆壳，主要是因为Fe、Mg质矿物化学稳定性较差，易被风化侵蚀，从而造成元素的迁移淋溶。碱金属元素含量与上部陆壳相差不大，在空间上也较为稳定，是因为MRS沉积环境为寒冷干燥的气候条件，碱金属化学元素流动性较

表2 MRS表层沉积物常量元素含量

Tab. 2 Content of major elements in surface sediments at MRS

元素	MRS	变化范围	平均值	标准差	变异系数	背景值[35]
SiO_2	MRC	61.22~64.09	62.56	1.09	0.02	66.00
	SBC	62.43~65.83	64.32	1.06	0.02	
Al_2O_3	MRC	9.09~10.39	9.82	0.48	0.05	15.20
	SBC	9.59~10.03	9.81	0.14	0.01	
Na_2O	MRC	2.99~3.76	3.39	0.33	0.10	3.90
	SBC	3.44~3.86	3.60	0.14	0.04	
CaO	MRC	3.17~4.63	3.96	0.56	0.14	4.20
	SBC	3.19~4.85	4.05	0.54	0.13	
Fe_2O_3	MRC	1.70~2.24	1.97	0.19	0.10	5.00
	SBC	1.82~2.04	1.92	0.10	0.05	
K_2O	MRC	1.70~1.79	1.76	0.03	0.02	3.40
	SBC	1.56~1.74	1.68	0.06	0.03	
MgO	MRC	0.61~1.12	0.87	0.20	0.23	2.22
	SBC	0.54~0.98	0.77	0.14	0.18	
TiO_2	MRC	0.12~0.17	0.14	0.02	0.15	0.50
	SBC	0.10~0.12	0.11	0.01	0.08	
MnO	MRC	0.02~0.03	0.03	0.00	0.11	0.06
	SBC	0.02~0.03	0.03	0.00	0.13	
P_2O_5	MRC	–	0.02	0.00	0.12	0.55
	SBC	–	0.02	0.00	0.06	

注：–表示无数据。

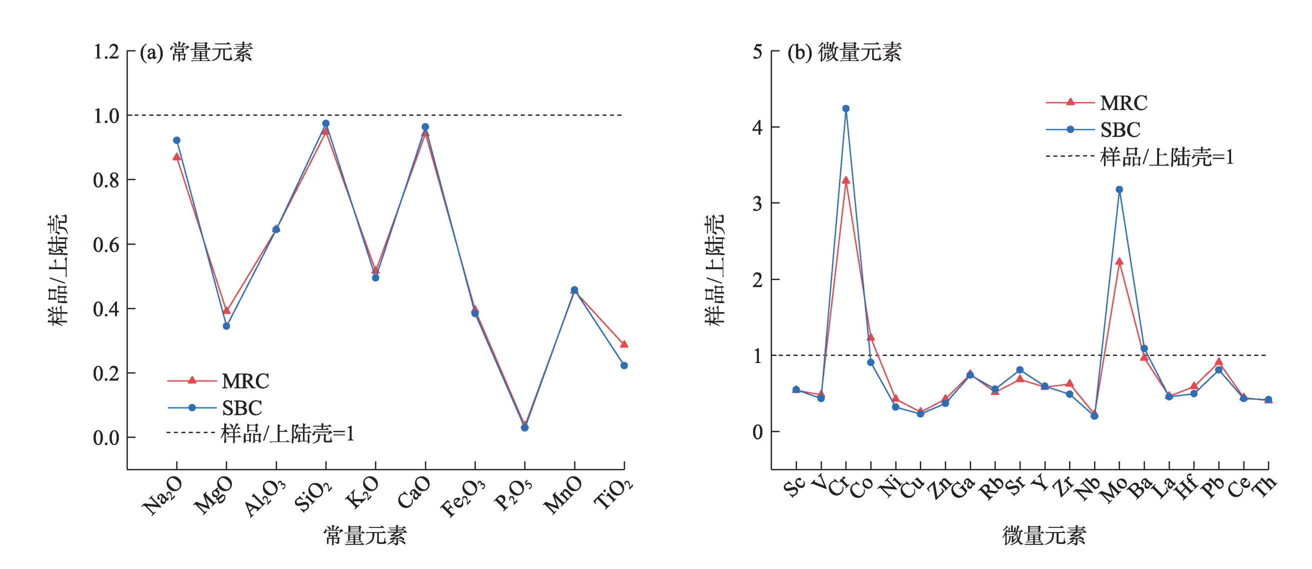


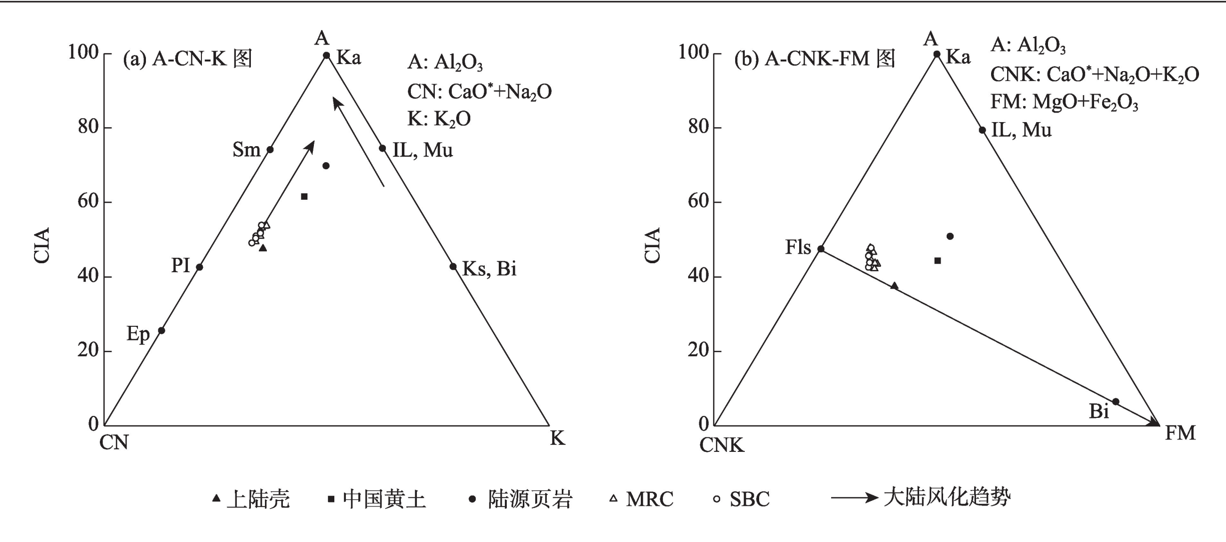
图4 MRS表层沉积物地球化学元素UCC标准化

Fig. 4 UCC-normalized pattern of geochemical elements for surface sediments at MRS

低，不易被迁移淋溶[36]。

3 讨论

MRS的形成条件与巨型沙波纹有相同之处。普遍认为，巨型沙波纹的形成需要双峰乃至多峰的粒度分布条件[5,34,38]，MRC双峰型、SBC三峰型的粒度分布也印证了这一点。MRC粗颗粒的含量较SBC更高，其他地区的MRS也是如此[6]。正因如此，MRC的巨型沙波纹尺寸要大于SBC[2]。Gough[39]的模拟结果表明，粗颗粒的含量是MRS形成的关键，粗颗粒在某些位置集中并向下风向扩张形成MRC，而粗颗粒不足的位置逐渐形成SBC。柴达木盆地MRS最粗的沙粒可达5.04 mm，要大于目前绝大多数研究中的巨型沙波纹[34,40–42]，同时也大于目前已知



注：Ks为钾长石；Bi为黑云母；IL为伊利石；Mu为白云母；Ka为高岭石；Sm为蒙脱石；PI为斜长石；Ep为绿帘石；Fls为长石。

图5 MRS表层沉积物A-CN-K及A-CNK-FM三角图解

Fig. 5 A-CN-K and A-CNK-FM ternary plots of surface sediments at MRS

其他地区的MRS[6]。此外，粗颗粒的聚集会在波峰位置形成一层保护层，能对风蚀起到一定的抑制作用[43]。MRS的粗颗粒含量相较一般的巨型沙波纹要更高，抵御风蚀的能力更强，这也导致了风力的分选作用较弱[13]，MRC和SBC的分选性都很差。

MRS的特殊形态意味着形成过程要远比一般的巨型沙波纹复杂。根据本文研究区周围的环境推测，首先在倒置河床的下风向形成巨型沙波纹并不断发育，脊线粗颗粒含量相对少的位置会被风力搬运侵蚀“断开”，经过长时间的风力作用逐渐形成MRS。现场观测发现，MRC波谷的位置要低于SBC，意味着MRC波谷位置被风蚀，在MRS形成过程中还存在垂直于风向的颗粒搬运，这与Gough[39]的结论一致。

研究区风化程度较中国其他沙漠要弱[16,19-23]。以往对沉积物的研究发现，沉积物粒度与CIA有一定的相关性。在长江流域，CIA随着粒径的减小呈增大趋势；在戈壁区域恰恰相反，CIA随着粒径的减小逐渐减小[12,18]。通过本文研究，柴达木盆地MRS粒径变化与CIA变化趋势的相关性并不显著。Fe、Mg含量则沿风向一直在降低，同样与粒径变化无显著关系。这是因为Fe、Mg质矿物化学稳定性较差，易在风力搬运侵蚀的作用下风化破碎并富集在颗粒较小的位置。MRS表层均为较粗的颗粒，故而Fe、Mg含量无升高的趋势。目前，现有的研究和数据并不足以完全揭示MRS的形成机理，还有很多问题尚未解决，有待进一步研究。

4 结 论

本文通过实地采集MRS表层沉积物，对柴达木盆地中南部MRS的粒度和化学元素组成特征进行了分析，为开展MRS相关研究提供了参考，主要结论如下：

（1）柴达木盆地MRS表面沉积物中，MRC的优势粒级为砾石（44.24%~50.19%）和极细沙（15.91%~20.42%），粒度分布呈双峰型；SBC的优势粒级为极粗沙（26.00%~35.90%）和细沙（14.80%~20.47%），粒度分布呈三峰型。

（2）MRC和SBC分选均很差，峰态为宽到很宽，二者峰度正负偏情况均存在，但以正偏为主。MRC和SBC虽然都有差异较大的个体，但概率累积频率变化的总体趋势仍保持一致。

（3）MRS表面沉积物常量元素以SiO_2和Al_2O_3为主，其中SiO_2占据绝对优势，含量61.22%~65.83%，其余常量元素含量均不超过4.85%。所有常量元素的变异系数均小于0.3，说明其含量在MRS不同位置无较大变动。微量元素以Cr、Co、Mo和Ba为主，含量整体变化不大，变异系数均小于0.36。相较于上部陆壳，Cr和Mo的UCC标准化值大于1，表现为富集状态，其余微量元素和所有常量元素均为迁移淋失状态。

（4）从风化特征上，柴达木盆地MRS为寒冷干燥环境下的低等化学风化，风化程度小于其他沙漠，但要高于UCC。MRS处于大陆风化初期，平均

组成与UCC较为接近，且分布很集中，说明MRS各处风化程度差异不大，化学风化侵蚀处于相对稳定的状态。

参考文献（References）

[1] Tsoar H. Bagnold R A 1941: The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen[J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18(1): 91−96.

[2] Yizhaq H, Katra I, Isenberg O, et al. Evolution of megaripples from a flat bed[J]. Aeolian Research, 2012, 6: 1−12.

[3] 李猛, 董治宝, 张正偲. 风成沙波纹数学模型综述[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1285−1292. [Li Meng, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai. Overview on mathematical models of aeolian sand ripples[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1285−1292.]

[4] 梅凡民, 高自文, 蒋缠文. 风沙流中蠕移粒子群动量分布特征的风洞实验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 473−479. [Mei Fanmin, Gao Ziwen, Jiang Chanwen. The stochastic distribution of rolling particles' momentum during aeolian sand transports based on digital high-speed photography images taken in a blown sand wind tunnel[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 473−479.]

[5] Han Q J, Qu J J, Zu R P, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: Morphological and sedimentary characteristics, and development processes[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2022, 127(5): e2021JF006448, doi: 10.1029/2021JF006448.

[6] Gough T R. Megaripple Stripes[D]. Calgary: University of Calgary, 2019.

[7] Simons F S, Ericksen G E. Some desert features of northwest central Peru[J]. Boletin de la Sociedad Geológica del Perú, 1953, 26: 229−246.

[8] Newell N D, Boyd D W. Extraordinarily coarse eolian sand of the Ica Desert, Peru[J]. Journal of Sedimentary Research, 1955, 25: 226−228.

[9] Haney E M, Grolier M J. Geologic map of major Quaternary eolian features, northern and central coastal Peru[R]. Virginia: United States Geological Survey, 1991.

[10] Durán O, Claudin P, Andreotti B. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws[J]. Aeolian Research, 2011, 3(3): 243−270.

[11] Silvestro S, Vaz D, Di Achille G, et al. Evidence for different episodes of aeolian construction and a new type of wind streak in the 2016 ExoMars landing ellipse in Meridiani Planum, Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2015, 120(4): 760−774.

[12] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1441−1453. [Luo Wanyin, Dong Zhibao, Qian Guangqiang, et al. Geochemical compositions of surface sediment from gobi desert in northern China and its sedimentary significance[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1441−1453.]

[13] 潘凯佳, 张正偲, 董治宝, 等. 河西走廊新月形沙丘表层沉积物的理化性质[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 44−51. [Pan Kaijia, Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, et al. Physicochemical characteristics of surface sediments of crescent-shaped sand dunes in the Hexi Corridor, Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 44−51.]

[14] Liang A M, Dong Z B, Su Z Z, et al. Provenance and transport process for interdune sands in the Kumtagh Sand Sea, northwest China[J]. Geomorphology, 2020, 367: 107310, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107310.

[15] Zhang Z C, Pan K J, Zhang C X, et al. Geochemical characteristics and the provenance of aeolian material in the Hexi Corridor Desert, China[J]. Catena, 2020, 190: 104483, doi: 10.1016/j.catena.2020.104483.

[16] 陈国祥. 毛乌素沙地风成沉积物沉积学特征[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [Chen Guoxiang. Sedimentological characteristics of aeolian sediments in Mu Us Sandy Land[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.]

[17] 张焱, 马鹏飞, 曾林, 等. 基于沉积物理化性质的雅鲁藏布江中游粉尘物源研究[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 92−100. [Zhang Yan, Ma Pengfei, Zeng Lin, et al. Study on silt and clay provenance in the Yarlung Zangbo River middle reaches using sediment physicochemical characteristics[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 92−100.]

[18] 邵菁清, 杨守业. 化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候?[J]. 科学通报, 2012, 57(11): 933−942. [Shao Jingqing, Yang Shouye. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River Basin?[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(11): 933−942.]

[19] Ando S, Rittner M, Vermeesch P, et al. The provenance of Taklamakan Desert sand[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 437: 127−137.

[20] Hu F G, Yang X P. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 179−192.

[21] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和风化过程[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 53−64. [Xu Zhiwei, Lu Huayu, Zhao Cunfa, et al. Composition, origin and weathering process of surface sediment in Kumtagh Desert, northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 53−64.]

[22] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Dong Zhibao, Su Zhizhu, Qian Guangqiang, et al. Aeolian geomorphology of the Kumtagh Desert[M]. Beijing: Science Press, 2011.]

[23] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011. [Li Enjü. Comparative study on

sediment characteristics of Badain Jaran Desert and Tengger Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.]

[24] 伍光和, 胡双熙, 张志良, 等. 柴达木盆地[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1990. [Wu Guanghe, Hu Shuangxi, Zhang Zhiliang, et al. Qaidam Basin[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1990.]

[25] 梁爱民, 董治宝, 张正偲, 等. 沙漠倒置河床研究进展及其对火星类似物研究的启示[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 14-24. [Liang Aimin, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. Study on the desert inverted channels and its implication for the study of the analogue on Mars[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 14-24.]

[26] 格尔木市地方志编纂委员会. 格尔木年鉴(2020)[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2020. [Golmud Local Chronicles Compilation Committee. Golmud Almanac (2020)[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2020.]

[27] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春, 等. 柴达木盆地风况及输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 195-203. [Chen Zongyan, Dong Zhibao, Wang Qingchun, et al. Characteristics of wind regime and sand drift potential in Qaidam Basin of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 195-203.]

[28] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.

[29] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1914, 25(1): 655-744.

[30] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.

[31] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1969, 39(3): 1074-1106.

[32] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠84°E沿线沙物质的粒度特征[J]. 地理学报, 1993, 48(1): 33-46. [Chen Weinan. Grain size parameters of aeolian sediments in the vicinity of the longitude 84°E, Taklamakan Desert[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(1): 33-46.]

[33] 王晓枝, 董治宝, 南维鸽, 等. 拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 22-31. [Wang Xiaozhi, Dong Zhibao, Nan Weige, et al. Sediment characteristics of climbing dunes in Lhasa River Valley, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 22-31.]

[34] Qian G Q, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: Morphology, grain size and influencing factors [J]. Sedimentology, 2012, 59(6): 1888-1901.

[35] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Palo: Blackwell Scientific Publications, 1985.

[36] 李绪龙, 张霞, 林春明, 等. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 2022, 28(1): 51-63. [Li Xulong, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(1): 51-63.]

[37] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5 Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. 中国科学: 地球科学, 2001(2): 136-145. [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, et al. Changes in chemical composition of aeolian dust in the Loess Plateau and chemical weathering in inland Asia since the last 2.5 Ma [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2001(2): 136-145.]

[38] Tholen K, Pahtz T, Yizhaq H, et al. Megaripple mechanics: Bimodal transport ingrained in bimodal sands[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 162, doi: 10.1038/s41467-021-26985-3.

[39] Gough T, Hugenholtz C, Barchyn T. Eolian megaripple stripes[J]. Geology, 2020, 48(11): 1067-1071.

[40] Yizhaq H, Isenberg O, Wenkart R, et al. Morphology and dynamics of aeolian mega-ripples in Nahal Kasuy, southern Israel[J]. Israel Journal of Earth Sciences, 2009, 57(3): 149-165.

[41] Isenberg O, Yizhaq H, Tsoar H, et al. Megaripple flattening due to strong winds[J]. Geomorphology, 2011, 131(3-4): 69-84.

[42] 韩广, 龙鲜, 丁占良, 等. 科尔沁沙地大型沙波纹的初步研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 56-64. [Han Guang, Long Xian, Ding Zhanliang, et al. Preliminary study on the large-scale ripples in the Korqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 56-64.]

[43] Yizhaq H, Katra I, Kok J F, et al. Transverse instability of megaripples[J]. Geology, 2012, 40(5): 459-462.

Characteristics of grain size and geochemical elements composition of surface sediments of megaripple stripes in the Qaidam Basin

WANG Lijie, XIAO Fengjun, DONG Zhibao, MA Huirong, CHEN Hao

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: Megaripple stripes (MRS) are an enigmatic eolian bedform pattern characterized by alternating megaripples corridor (MRC) and smaller bedform corridor (SBC), oriented crosswise to the prevailing wind direction. MRCs have taller bedforms, longer wavelengths, and coarser surface sediments compared with the intervening SBCs. MRSs are widely distributed across the middle and southern margins of the Qaidam Basin, Qinghai Province of China, but their comprehensive study remains limited. Analyzing MRS surface sediments can provide a reference for the subsequent study on its formation and evolution, along with the erosion and deposition processes of eolian sand. Herein, 112 surface sediment samples were collected from the middle and southern margins of the Qaidam Basin. The physical (grain size characteristics) and chemical properties (major and trace elements) of these sediment samples were analyzed. The results of this study are as follows: (1) MRCs primarily consist of gravel and very fine sand, with gravel and very fine sand contents ranging from 44.24% to 50.19% and 15.91% to 20.42%. The grain size frequency curve of MRCs shows a bimodal distribution. Conversely, SBCs are primarily composed of very coarse and fine sands, varying from 26.00% to 35.90% and 14.80% to 20.47%. The grain size frequency curve of SBCs shows a trimodal distribution. (2) MRS sorting parameters are poor and exhibit positive and negative skewness but primarily positive skewness. MRS kurtosis is relatively wide to very wide. (3) There are no considerable differences in the content of chemical elements between MRCs and SBCs. The major elements of MRS primarily consist of SiO_2 and Al_2O_3, with the highest SiO_2 content of ~63% and Al_2O_3 content hovering at ~10%. The trace elements, such as Cr, Co, Mo, and Ba, play a dominant role compared to the upper continental crust, Cr and Mo elements show an enriched state, while other elements show signs of leaching. (4) MRS sedimentary environment in the middle and southern margin of the Qaidam Basin is cold and dry. These areas have experienced low chemical weathering, with relatively stable chemical weathering. Compositionally, they closely resemble the upper continental crust and are in the early stage of continental weathering.

Key words: megaripple stripes; Qaidam Basin; sediments; grain size; chemical elements